

УПРАВЛЯЕМАЯ ТРАНСФОРМАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ БИПОЛЯРНЫХ МОЩНЫХ СВЧ-ТРАНЗИСТОРОВ ИОННЫМИ ПУЧКАМИ

В.А. Солодуха, Ю.П. Снитовский

ОАО «Интеграл», ул. Казинца, 121А, Минск, 220108, Беларусь
VSaladukha@integral.by, yu.snitovsky@tut.by

Исследовано влияния ионного облучения фосфором, аргоном на границу раздела сформированных заранее омических контактов Mo/Si к эмиттерам СВЧ-транзистора. Показано, что такое облучение ионами фосфора с энергией 100 кэВ и последующей термообработкой при температурах 400-500 °С приводит к снижению величины переходного сопротивления контактов более чем на 2 порядка величины. Исследованы физические причины, обуславливающие эти позитивные изменения электросопротивления контактных областей. Применение предложенного подхода позволяет улучшить энергетические и частотные характеристики СВЧ-транзисторов, а также повысить их радиационную стойкость.

Введение

Наличие метода, обеспечивающего возможность контролируемого создания объемного "рисунка", состоящего из областей с требуемыми физическими и химическими свойствами, является ключевым условием для радикального прогресса в технологии XXI века [1]. Это особенно актуально, если метод позволяет обеспечить создание таких областей с размерами вплоть до нанометровых. Физические основы новой технологии (как для кристаллических, так и аморфных тел) связаны с эффектом селективного удаления атомов (СУА) из тонких пленок двух- или многоатомных соединений пучком ускоренных частиц. Принципиальным является то, что процесс СУА под воздействием падающего пучка по своей природе является нетермическим в широком диапазоне температур облучения, чем принципиально отличается от химических реакций, а также от процессов превращения веществ в соответствии с фазовыми диаграммами состояний. Однако касательно управляемой трансформации параметров кремниевых биполярных мощных СВЧ-транзисторов ионными пучками имеются скудные сведения [2, 3].

В работе показана возможность целенаправленного изменения параметров мощного СВЧ-транзистора в результате облучения ионами Р сформированных омических контактов Mo/Si к эмиттерам транзистора. В результате можно вызвать изменения электрофизических и химических свойств в соответствующем слое кристалла или тонких пленках. Система Mo/Si выбрана в данном случае как одна из самых распространенных при производстве приборов, имеющих мелкозалегающие p - n -переходы (0,1-0,2 мкм), в частности СВЧ-транзисторов.

Методика проведения исследований

Измерение ρ_k и исследование структуры переходного слоя контактов проводили по методике [3]. Измерение параметров СВЧ-транзисторов проводили в специальных режимах. Транзисторы были изготовлены как по стандартной [3], так и новой (предложенной) технологии [4]. Компьютерное моделирование процесса облучения ионами Р сформированных омических контактов Mo/ n^+ Si к эмиттерам транзистора проводилось с

использованием программы SSUPREM4 программного комплекса компании Silvaco [5].

Результаты исследований

Установлено, что характер изменения ρ_k контактов Mo/ n^+ Si с возрастанием температуры отжига существенно зависит как от дозы легирования кремния D_1 , так и от дозы облучения контактов D_2 . При дозе легирования кремния P $D_1 = 6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, при отжиге ρ_k уменьшается в 2,5 раза (рис. 1, кривая 2), а при дозах $6.25 \cdot 10^{14}$ и $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ возрастает в 3,0 и 12,5 раз (рис. 1, кривые 3, 5).

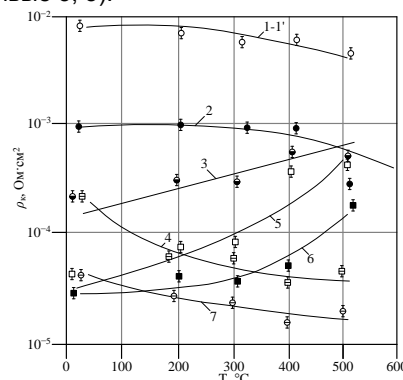


Рис. 1. Зависимость ρ_k контактов Mo/ n^+ Si от температуры отжига. Доза легирования кремния P D_1 : 1–1', 2 – $6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$; 3, 4 – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$; 5, 6 – $6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$; 7 – $4.375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Доза облучения контактов D_2 : 1, 4, 6, 7 – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (Р); 1' – $6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (Ar).

Наблюдаемые зависимости могут быть объяснены образованием на границе раздела Mo/ n^+ Si силицидов молибдена, скорость роста которых существенно зависит от совершенства структуры приповерхностных слоев Si. Большая доза легирования Si влечет за собой большее количество структурных дефектов, сохраняющихся при «безразгоночном» отжиге, что приводит к повышенной диффузии атомов Si в Mo с границ зерен поликристаллической фазы Si, образовавшейся после рекристаллизации аморфизованного слоя [6]. Возможно также образование и фосфидов молибдена, а также соединений Mo с Si, вероятность образования которых повышается с увеличением дозы легирования Si фосфором. Так

как электропроводность фосфидов невысока, то их образование также приведет к росту ρ_k .

При дозе легирования Si $D_1 = 6.25 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ионами Р, однако, облучение контактов Mo/ n^+ Si как ионами Р, так и Ag дозой $D_2 = 6.25 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ при энергии $E_2 = 100 \text{ кэВ}$ приводит к увеличению ρ_k почти на порядок, а после отжига при температурах до 500°C – лишь к некоторому снижению величины ρ_k на 20-30 % (рис. 1, кривая 1).

Увеличение ρ_k может быть объяснено каскадным перемешиванием атомами отдачи Мо и потоком ионов Р (Ag) границы раздела Mo/ n^+ Si [7], что приводит к сильному разупорядочению приповерхностных слоев Si. При этом, как показано в [8] образуется слой с пониженной электропроводностью, что и приводит к увеличению переходного сопротивления контактов. В диапазоне доз легирования Si $D_1 = 6.25 \cdot 10^{14} - 4.375 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ионами Р, после облучения контактов ионами Р увеличения ρ_k не наблюдается. Отжиг в диапазоне температур от 200 до 500°C приводит к уменьшению ρ_k в 2-5 раз (рис. 1, кривые 4, 7).

Эффект снижения ρ_k при имплантационном легировании приповерхностной области Si через пленку Мо с энергией ионов, соответствующих среднему проективному пробегу, не меньше толщины пленки Мо, может быть обусловлен следующими физическими процессами. Во-первых, разрушением пленки естественного SiO₂ на границе раздела Mo/ n^+ Si и установлением тесного контакта металл – полупроводник. Во-вторых, насыщением приповерхностного слоя Si дополнительным количеством, внедряемой примеси того же типа, которой легирован Si. В-третьих, образованием атомов отдачи Мо, которые переходят в Si и насыщают приповерхностный слой. В-четвертых, образованием большого количества радиационных дефектов под действием, как основного потока ионов Р, так и атомов отдачи Мо, которые при достаточной дозе легирования образуют аморфизованный слой Si. Отжиг приводит к рекристаллизации аморфизованного слоя, активации ~50 % примеси, внедренной через пленку Мо, и атомов отдачи Мо. При этом атомы Мо создают примесные центры с глубокими уровнями [9], что в совокупности с остаточной дефектностью приповерхностных слоев Si должно повышать скорость рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта и вести к повышению быстродействия прибора (граничной частоты коэффициента передачи тока – f_{rp}), в состав которого включены данные контакты. Наряду с этим происходит образование силицидов молибдена на границе раздела Mo/ n^+ Si [3]. Однако изменение электронной структуры границы раздела вследствие установления тесного контакта Mo/ n^+ Si и увеличение концентрации носителей заряда за счет внедрения дополнительного количества примеси превалирует над процессами увеличения ρ_k за счет образования слоя силицидов молибдена. Это подтверждается результатами измерения поверхностного сопротивления Si (ρ_s) от температуры отжига контактов Mo/ p^+ Si и Mo/ n^+ Si, облученных ионами В, Р, Ag при $D_1 = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, представленными в работе [10].

При этом показано, что на графике ρ_s в этом случае отсутствует скачок сопротивления после облучения Mo/ n^+ Si контактов ионами Ag и Р по сравнению с контактами Mo/ p^+ Si, облученными ионами Ag и В.

Снижение ρ_k контактов Mo/ n^+ Si после облучения ионами Р было также подтверждено в работе [11]. Разница состоит в том, что в данном случае аналогичный эффект был получен при гораздо меньших дозах облучения и температурах отжига контактов. В частности, при дозе легирования Si ионами Р $D_1 = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ после отжига контактов, облученных ионами Р, происходит увеличение ρ_k приблизительно в 6 раз (рис. 1, кривая 6). В этом случае ρ_k контактов до облучения незначительно выше, чем после облучения и для температуры отжига 500°C составляет $6 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. При этом ВАХ контактов были линейными и симметричными относительно начала координат, то есть контакты были омическими.

Установлено [10], что электронограммы от исходных образцов, не подвергавшихся облучению, содержат точечные рефлексы от моно-Si и кольцевые рефлексы от пленки Мо. Помимо них имеются рефлексы от слоя поли-Si, свидетельствующие о том, что в приповерхностном слое Si имеется мелкодисперсный поли-Si слой, образовавшийся в процессе имплантации Р и последующего активационного отжига.

В результате отжига в переходном слое контактов образуется дисилицид молибдена MoSi₂ с гексагональной кристаллической решеткой и Mo₃Si. Следовательно, выдвинутые выше предположения о том, что повышение ρ_k при отжиге объясняется образованием силицидов на границе раздела Mo/ n^+ Si, подтверждаются данными проведенных электронографических исследований.

Облучение контактов ионами Р, Ag приводит к появлению размытых рефлексов от пленки Мо и от слоя Si, что свидетельствует о сильном разупорядочении структуры пленки Мо и слоя Si, в результате чего значительно возрастает ρ_k контактов. В процессе отжига [3] происходит упорядочение структуры и формирование в переходном слое контактов новых фаз – силицидов и фосфидов молибдена – силицид Si₃Mo₅ с гексагональной кристаллической решеткой, сверхструктура Mo₃Si [12], MoSi₂ с тетрагональной кристаллической решеткой и фосфид молибдена – MoP_{0.75}, при этом ρ_k контактов уменьшается.

Образование при отжиге силицидов Si₃Mo₅, богатых металлом, обусловлено тем, что ионы Р имеют массу в 3 раза большую, чем ионы В. Что и вызывает при облучении большее количество атомов отдачи Мо, тем более что для внедрения через пленку Мо одинаковой толщины применяли ионы Р с энергией $E_2 = 100 \text{ кэВ}$, а ионы В имели энергию в полтора – два раза ниже [12]. Кроме того, большее количество атомов отдачи Мо в случае облучения ионами Р приводит к образованию слоя MoSi₂ до отжига при дозе $D_2 = 3.125 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. При этом при отжиге происходит увеличение толщины слоя MoSi₂, о чем говорит увеличение относительной интенсивности рефлексов, принадлежащих этой фазе. В результате

моделирования установлено [10], что концентрация Р растет с повышением дозы бомбардирующих ионов. Наличие участка с постоянной концентрацией Р в приповерхностной области Si при малой глубине диффузии обеспечивает получение эмиттерных переходов с высоким коэффициентом инжекции [10]. Таблица иллюстрирует результаты экспериментов и моделирования по исследованию параметров КТ916А.

Таблица - Доза облучения ионами Р контактов Mo/n⁺Si, концентрация Р и параметры транзистора

Доза D_i , см ⁻²	Концентрация фосфора		Параметры транзистора		
	$C_s \cdot 10^{19}$, см ⁻³	$C_{max} \cdot 10^{20}$, см ⁻³	$f_{гр1}$, ГГц	$f_{гр2}$, ГГц	η_k , %
$0.5 \cdot 10^{14}$	6.20	7.13	2.60	2.40	80.8
$0.9 \cdot 10^{14}$	6.50	7.14	3.60	3.20	82.2
$1.5 \cdot 10^{14}$	7.00	7.16	4.00	3.85	84.2
$2.5 \cdot 10^{14}$	7.90	7.19	4.40	4.25	86.7
$4.0 \cdot 10^{14}$	9.00	7.26	4.80	4.65	88.3
$6.2 \cdot 10^{14}$	10.80	7.35	5.30	5.16	93.0

Видно, что с повышением дозы облучения ионами Р контактов, растет $f_{гр}$ и коэффициент полезного действия коллектора (η_k). Повышение η_k обусловлено тем, что транзисторы, контакты которых облучались ионами Р с последующим отжигом, отдают одну и ту же выходную мощность при меньшем токе коллектора, чем транзисторы, контакты которых не облучались. Это свидетельствует о том, что снижаются омические потери в пассивных слоях и омических контактах Mo/n⁺Si. Поскольку вклад этих потерь в выходные параметры приборов мал [13], увеличение η_k транзисторов, контакты которых облучались ионами фосфора, можно объяснить снижением ρ_k контактов Mo/n⁺Si после термообработки [3]. Увеличение $f_{гр}$ обусловлено повышением скорости рекомбинации неосновных носителей в зоне контакта за счет создания атомами Мо примесных центров с глубокими уровнями, что в совокупности с остаточной дефектностью приповерхностных слоев Si позволяет повысить радиационную стойкость биполярных СВЧ-транзисторов [3; 14].

Исследования позволили разработать новый способ изготовления транзистора [15].

Заключение

В ходе экспериментов установлено, что отжиг при температуре 400-500 °С облученных ионами

Р Mo/n⁺Si контактов приводит к снижению их величины переходного сопротивления более чем на 2 порядка, а облучение ионами Ag приводит к необратимому увеличению переходного сопротивления. Показано, что модификация свойств омических контактов является следствием изменения его атомного состава и тех структурных превращений, которые сопутствуют СУА из материала. Результаты экспериментов и моделирования по исследованию зависимости параметров транзистора КТ916А в зависимости от дозы легирования области эмиттеров Р через пленку Мо продемонстрировали, что с увеличением дозы легирования растет концентрация фосфора. При этом улучшаются как энергетические, так и частотные характеристики транзистора, повышается радиационная стойкость.

Список литературы

1. Гурович Б.А., Долгий Д.Н., Кулешова Е.А. и др. // УФН. 2001. Т. 171. № 1. С. 105 – 117.
2. Данилов В.Ф., Снитовский Ю.П., Рассадин А.А., Калиновченко В.П. // А. с. 897048 СССР с пр. 09.09.1980.
3. Снитовский Ю.П. // Электрон. промышленность. 1992. № 1. С. 59-6.
4. Снитовский Ю.П., Матюшевский А.П. // А. с. 1828333 СССР с пр. 04.11.1989.
5. <http://www.silvaco.com>
6. Гурский Л.И., Зеленин В.А., Бобченко Ю.Л. и др. // Изв. АН БССР. Сер. физ.-техн. наук. 1981. № 1. С. 112-116.
7. Tokuyama T., Miyao M., Yoshihir N. // Japan. J. Appl. Phys. 1978. V. 17. № 8. Р. 1301-1315.
8. Аброян И.А., Дубро В.В., Ильин И.А. и др. // Электрон. техника. Сер. 2. 1981. Вып. 4. С. 36-40.
9. Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М.: Мир. 1977. 562 с.
10. Солодуха В.А., Снитовский Ю.П. // Доклады НАН Беларуси. 2015. Т. 59. № 1. С. 112-117.
11. Chiang S.W., Chow T.P., Reihl R.F., Wang K.L. // J. Appl. Phys. 1981. V. 52. № 6. Р. 4027-4032.
12. Гурский Л.И., Зеленин В.А., Бобченко Ю.Л. // Физика и химия обработки материалов. 1984. № 5. С. 72-75.
13. Тагер, А.С. // Литовский физический сборник. 1981. Т. 21. № 4. С. 23-44.
14. Снитовский Ю.П. // Труды XIV Межд. совещания «Радиационная физика твердого тела». Севастополь. 5-10 июля 2004 г. М., 2004. С. 445-449.
15. Снитовский Ю.П., Нелая В.В., Ефремов В.А. // Пат. 15265 Респ. Беларусь с пр. 22.04.2009.

CONTROLLED ION-BEAM TRANSFORMATION OF SILICON BIPOLAR MICROWAVE POWER TRANSISTOR'S CHARACTERISTICS

V.A. Solodukha, Yu.P. Snitovsky

ОАО «Integral», Kazinka I.P. 121A, Minsk, 220108, Belarus,
VSaladukha@integral.by, yu.snitovsky@tut.by

In this article, a method for changing the silicon bipolar microwave power transistor's characteristics in a direct and deliberate manner by modifying the chemical composition at the molybdenum – silicon boundary, the electrophysical properties of molybdenum – silicon contacts, and the electrophysical characteristics of transistor structure areas by the phosphorus ions irradiation of generated ohmic molybdenum – silicon contacts to the transistor emitters is proposed for the first time. The possibilities of this method are investigated and confirmed experimentally.